

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ СООРУЖЕНИЙ
ГЕОДЕЗИЧЕСКО–МАРКШЕЙДЕРСКИМИ МЕТОДАМИ
В ОСОБЫХ ГРУНТОВЫХ УСЛОВИЯХ**

О.В. Зенин

Предлагается метод определения допустимых размеров вертикальных деформаций в зависимости от измерений здания, их построек, предписаний, качества постройки и строительных материалов.

Ключевые слова: деформация; маркшейдерские методы; сооружение; здание.

В большинстве случаев деформации зданий и сооружений возникают в результате вертикальных смещений (осадок) грунта основания. Вертикальные смещения, если они равномерны, не вызывают деформации основания. В результате неравномерных вертикальных смещений возникают деформации – наклоны и искривления оснований, которые оказывают наибольшее воздействие на здания и появление в них повреждений. Наклон характеризуется разностью осадок двух точек, отнесенных к расстоянию

между этими точками. Разность наклонов двух смежных участков является неравномерностью наклонов, а неравномерность наклонов, отнесенная к длине изгибаемого участка, выражает его кривизну, которая может быть выражена радиусами кривизны, прогибами и перегибами.

Эти величины связаны между собой следующей зависимостью:

$$K = \frac{1}{R} = \frac{r}{L} = \frac{8h}{L^2} = \frac{8f}{L},$$

где K – кривизна, $1/\text{м}$; R – радиус кривизны, м или км ; ρ – неравномерность наклонов; h – абсолютная величина прогиба (перегиба), мм или м ; f – относительный прогиб (перегиб); L – длина изгибаемого участка, м .

За основной показатель деформации оснований, возникающих под влиянием различных факторов, можно принять кривизну (радиус кривизны) деформируемого участка по аналогии как и над горными выработками. Сделав такое допущение, можно установить допустимые величины неравномерностей вертикальных смещений для различных зданий и сооружений, подверженных влиянию не только горных выработок, но и других перечисленных выше факторов.

Многочисленные случаи деформаций зданий позволили применить методы математической статистики для установления зависимости между кривизной (радиусом кривизны) оснований и общими габаритами здания, выраженными отношением длины к высоте здания $\frac{L}{H_3}$. В результате корреляционного анализа установлена эмпирическая зависимость между допустимой и кривизной и отношением $\frac{L}{H_3}$, которая имеет следующее аналитическое выражение:

$$K_{\text{доп}} = \frac{B_k}{A_k} + C_k,$$

где $A_k = \frac{L}{H_3}$, B_k и C_k – постоянные коэффициенты уравнения.

Значения этих коэффициентов определены по способу наименьших квадратов и равны $B_k = 0,33 \text{ 1/км}$; $C_k = 0,04 \text{ 1/км}$.

Тогда

$$K'_{\text{доп}} = \frac{0,33 \cdot H_3}{L} + 0,04 \text{ или} \\ R'_{\text{доп}} = \frac{L}{0,33 \cdot H_3 + 0,04L}, \quad (1)$$

где $R'_{\text{доп}}$ в км , L и H_3 длина и высота здания в метрах.

Для оценки тесноты связи между $K'_{\text{доп}}$ и $\frac{L}{H_3}$ и достоверности полученной зависимости вычисленное отношение оказалось равным $0,60$, а утроенное значение квадратической ошибки составляет $0,18$.

Как известно, радиус кривизны основания, получаемый в результате расчета, является радиусом расчетной кривой в каждой ее точке.

Фактический, или как принято называть, “измеренный” радиус кривизны соответствует определенному участку земной поверхности, равному длине двух соседних интервалов. Он может в несколько раз отличаться от радиуса кривизны, получаемого по расчету. Радиусы кривизны, вычисленные по прогибам (перегибам) по установленной нами формуле в меньшей степени отличаются от радиусов кривизны расчетной кривой:

$$R = L \left(0,1 \frac{L}{H_3} + 0,13 \right) 10^{-3}. \quad (2)$$

Если длина изгибаемого участка при вычислении радиусов через прогиб (перегиб) соответствует двойному расстоянию между точками наблюдения, то разница между указанными радиусами кривизны будет минимальной.

Расстояния между точками при проведении натуральных наблюдений находятся в пределах $10\text{--}20 \text{ м}$, следовательно, наиболее рациональная длина изгибаемого участка для вычисления радиусов через прогиб (перегиб) составляет $20\text{--}40 \text{ м}$. В этом случае должны быть минимальные расхождения между значениями допустимых радиусов кривизны основания, вычисленных по формулам (1) и (2). В табл. 1 приведены значения допустимых радиусов кривизны, вычисленные по формулам (2) и (1) для зданий различной протяженности и этажности.

Как следует из данных табл. 1, наибольшая сходимости между вычисленными значениями наблюдается при длине зданий от 20 до 40 м .

Значения радиусов кривизны, вычисленные по указанным формулам, имеют существенные различия при $L < 15 \text{ м}$. За допустимые значения радиусов кривизны (или кривизны) целесообразно принимать средние значения, вычисленные по формулам (1) и (2). Принятые значения радиусов кривизны деформаций и кривизны земли приведены в табл. 2 для зданий высотой до 20 м .

Полученные зависимости имеют вполне определенную область применения, а именно: L – длина зданий до 100 м ; H_3 – высота зданий до 20 м ; K – кривизна земной поверхности от $0,02 \cdot 10^{-3} \text{ 1/м}$ до $1,0 \cdot 10^{-3} \text{ 1/м}$ (радиусы кривизны от 50 до 1 км); $\frac{L}{H_3}$ – отношение длины здания к высоте от 1 до 10 .

Приведенные в табл. 2 значения допустимых радиусов кривизны и кривизны земной поверхности могут быть выражены формулой:

$$R_{\text{доп}}^{\text{cp}} = \frac{d \cdot L}{\sqrt{H_3}}. \quad (3)$$

Таблица 1

Значения допустимых радиусов кривизны, вычисленные по формулам (1) и (2)

| Длина здания, м | Высота здания | | | | | | | |
|------------------------|---------------|------|--------------|------|--------------|------|--------------|------|
| | $H_3 = 5$ м | | $H_3 = 10$ м | | $H_3 = 15$ м | | $H_3 = 20$ м | |
| | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 |
| Радиусы кривизны, км | | | | | | | | |
| 5 | 2,7 | 0,7 | – | – | – | – | – | – |
| 10 | 4,9 | 1,5 | 2,7 | 1,4 | 1,8 | 1,4 | – | – |
| 20 | 8,2 | 3,4 | 4,9 | 3,0 | 3,4 | 2,9 | 2,7 | 2,8 |
| 30 | 10,0 | 5,7 | 6,7 | 4,8 | 4,8 | 4,5 | 3,8 | 4,4 |
| 40 | 12,4 | 8,4 | 8,2 | 6,8 | 6,1 | 6,2 | 4,9 | 6,0 |
| 60 | 14,6 | 15,0 | 10,5 | 11,4 | 8,2 | 10,3 | 6,7 | 9,6 |
| 80 | – | – | 12,3 | 16,8 | 10,0 | 14,7 | 8,2 | 13,6 |
| 100 | – | – | 13,7 | 23,0 | 11,0 | 19,7 | 9,5 | 18,0 |
| Кривизна 10^{-3} 1/м | | | | | | | | |
| 5 | 0,37 | 1,43 | – | – | – | – | – | – |
| 10 | 0,20 | 0,67 | 0,37 | 0,73 | 0,55 | 0,73 | – | – |
| 20 | 0,12 | 0,29 | 0,20 | 0,33 | 0,30 | 0,35 | 0,37 | 0,30 |
| 30 | 0,10 | 0,18 | 0,15 | 0,20 | 0,21 | 0,22 | 0,27 | 0,23 |
| 40 | 0,08 | 0,12 | 0,12 | 0,15 | 0,16 | 0,16 | 0,20 | 0,17 |
| 60 | 0,07 | 0,07 | 0,09 | 0,09 | 0,12 | 0,10 | 0,15 | 0,11 |
| 80 | – | – | 0,08 | 0,06 | 0,10 | 0,07 | 0,12 | 0,08 |
| 100 | – | – | 0,07 | 0,05 | 0,09 | 0,05 | 0,10 | 0,06 |

Примечание: 2 – результаты вычисления по формуле (2); 1 – результаты вычисления по формуле (1).

Таблица 2

Принятые значения допустимых радиусов кривизны (1) и кривизны земной поверхности (2)

| L, м | $H_3 = 5$ м | | $H_3 = 10$ м | | $H_3 = 15$ м | | $H_3 = 20$ м | |
|------|-------------|------|--------------|------|--------------|------|--------------|------|
| | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 |
| 5 | 0,90 | 1,1 | – | – | – | – | – | – |
| 10 | 0,44 | 2,3 | 0,55 | 1,8 | – | – | – | – |
| 15 | 0,28 | 3,6 | 0,35 | 2,9 | 0,42 | 2,4 | – | – |
| 20 | 0,20 | 5,0 | 0,26 | 3,8 | 0,32 | 3,1 | 0,36 | 2,8 |
| 30 | 0,14 | 7,2 | 0,18 | 5,6 | 0,22 | 4,3 | 0,25 | 4,0 |
| 40 | 0,10 | 10,0 | 0,14 | 7,2 | 0,16 | 6,3 | 0,18 | 6,6 |
| 60 | 0,07 | 14,0 | 0,09 | 11,0 | 0,11 | 9,1 | 0,13 | 7,7 |
| 80 | – | – | 0,07 | 14,0 | 0,08 | 12,5 | 0,10 | 10,0 |
| 100 | – | – | 0,06 | 17,0 | 0,07 | 14,0 | 0,08 | 12,5 |

Значения коэффициентов d' для различных длин и высот зданий

| L, м | Значение коэффициента при высотах зданий, м | | | | | | | |
|-----------------------------|---|------|------|------|----------------------------------|------|------|------|
| | при расчете R деформации | | | | при расчете R земной поверхности | | | |
| | 5 | 10 | 15 | 20 | 5 | 10 | 15 | 20 |
| 5 | 1,10 | – | – | – | 0,49 | – | – | – |
| 10 | 1,15 | 1,80 | – | – | 0,51 | 0,57 | – | – |
| 15 | 1,20 | 1,93 | 2,40 | – | 0,54 | 0,61 | 0,62 | – |
| 20 | 1,25 | 1,90 | 2,33 | 2,80 | 0,56 | 0,60 | 0,60 | 0,60 |
| 30 | 1,20 | 1,90 | 2,15 | 2,67 | 0,54 | 0,60 | 0,57 | 0,57 |
| 40 | 1,25 | 1,80 | 2,36 | 2,80 | 0,56 | 0,57 | 0,61 | 0,60 |
| Значения коэффициентов d' | | | | | | | | |
| 60 | 1,17 | 1,83 | 2,27 | 2,57 | 0,52 | 0,58 | 0,59 | 0,55 |
| 80 | – | 1,75 | 2,34 | 2,50 | – | 0,56 | 0,61 | 0,53 |
| 100 | – | 1,70 | 2,10 | 2,50 | – | 0,54 | 0,54 | 0,53 |
| Среднее | 1,20 | 1,83 | 2,28 | 2,64 | 0,53 | 0,58 | 0,54 | 0,56 |

Среднее значение

$$d'' = \frac{0,53 + 0,58 + 0,59 + 0,56}{4,0} = 0,57 \cdot 10^3.$$

Примем $d'' = 0,6 \cdot 10^3$, окончательно получим:

$$R_{дон}^{cp} = \frac{0,6}{\sqrt{H_3}} \cdot 10^3, \quad (4)$$

$$K_{дон}^{cp} = \frac{1,7 \sqrt{H_3}}{L} \cdot 10^{-3}, \quad (5)$$

где $R_{дон}$ – допустимый радиус кривизны земной поверхности, км, который сопоставляется с радиусом кривизны, получаемым при расчете деформаций; $K_{дон}$ – то же, кривизна 10^{-3} 1/м (табл. 3).

Величину допустимых деформаций определяют по формуле:

$$Q = q_1 \cdot q_2 \cdot q_3 \cdot q_4 \cdot q_5,$$

где q_1 – коэффициент, учитывающий капитальность, высоту, общую значимость и стоимость здания; q_2 – коэффициент, учитывающий назначение и характер эксплуатации здания; q_3 – коэффициент, учитывающий сложность конфигурации здания; q_4 – коэффициент, учитывающий наличие больших свободных пролетов в здании (свыше 15 м); q_5 – коэффициент, учитывающий качество строительных работ и стройматериалов.

С увеличением этажности здания при прочих равных условиях увеличивается его общая стоимость, капитальность и значимость. Поэтому величины допустимых деформаций земной поверхности должны уменьшаться с увеличением капитальности, стоимости, этажности и общей значимости здания. Значения коэффициента q_1 в этом случае будут возрастать.

Если для трехэтажных зданий принять значение $q_1 = 1$, то с изменением высоты здания на 1 этаж значение этого коэффициента будет изменяться на 0,15 (для 4-этажных зданий $q_1 = 1,15$, для 2-этажных $q_1 = 0,85$ и т.д.).

Коэффициент q_2 при переходе здания из одной группы в другую также можно принять равным 15%. Если для зданий группы “В” принять $q_2 = 1$, то с изменением группы на одну ступень значение q_2 будет изменяться, как и для q_1 , на 0,15.

Влияние конфигурации и жесткости зданий может быть оценено значениями коэффициентов q_3 и q_4 . Сложная конфигурация здания примерно на 10% уменьшает величину допустимой деформации. В этом случае значение коэффициента $q_3 = 1,1$ для зданий сложной конфигурации. Такое же значение можно принять для коэффициента q_4 при наличии в здании свободных пролетов более 15 м. Значение коэффициента q_5 изменяется от 1,0 до 1,2 и принимается в зависимости от качества строительства и стройматериалов.

Таким образом, допустимые величины вертикальных деформаций для зданий определяются в зависимости от габаритов зданий, их конструкций, назначения, качества строительства и строительных материалов. Если применить полученные величины допустимых деформаций здания, например, для условий просадочности грунтов, то необходимо знать величины деформаций основания в виде кривизны или радиусов кривизны и сопоставлять их с допустимыми величинами, получаемыми по приведенным выше формулам.